



気体中の液体噴射初期過程の解析

Analysis of the Initial Process of Liquid Injection into Gas

高城 敏美, 成宮 喜久男, 服部 廣司, 坂東 幸輔
 (Toshimi TAKAGI) (Kikuo NARUMIYA) (Hiroshi HATTORI) (Kosuke BANDO)
 大阪大学 (名誉教授) 大阪産業大学 大阪産業大学 (名誉教授) JR 東海
 (Osaka Univ. (Emeritus)) (Osaka Sangyo Univ.) (Osaka Sangyo Univ.(Emeritus)) (Central Japan Railway Company)

At the initial stage of injection, the injection liquid has not yet broken up and in a range of low surrounding pressure (0.048~0.10 MPa), the tip of the injection flow always forms a shape of a thin string. This phenomenon is not known popularly and the reason of the formation of the thin string is not clear. For higher surrounding pressure about 3.0 MPa, the mushroom shape is observed at the initial period but the root is not so thin. In this paper, by applying the MARS method for simulating free surface of two phase flow, the analysis of liquid injection into gas is practiced. The phenomena of the characteristic features of the initial liquid injection shape at low and high surrounding pressures are reproduced and reasons are cleared. And, the processes of the initial break-up of the liquid film are numerically observed.

Keywords: Liquid Injection into Gas, Simulation, MARS Method, Initial Shape, Break-up of Liquid Film, Comparison with Experiments

1. はじめに

気体中に液体(燃料)を噴射し、微粒化し、燃焼させることは、ディーゼル機関、ガソリン噴射機関、ガスタービン、燃焼炉等で多く見られ、また、それ以外の機器にも液体の噴射、微粒化は広く応用されている⁽¹⁾。このため、それらの性能を向上させるには、液体の噴射、微粒化等の特性を理解することが重要である。

液体がノズル噴孔から高圧または低圧雰囲気中へ噴出する過程について、実験^{(2)~(4)}あるいは解析^{(5)~(6)}した結果は種々報告されており、最近では、詳細な実験^{(7)~(10)}や解析^{(11)~(14)}が行われている。また、噴孔内での流動状況やキャビテーションが噴孔出口以降の流れや微粒化に影響しているという報告がある^{(7)~(8)}。しかし、液体噴射の初期の形状や微粒化過程などについて充分明確にされたとは言えない。

服部、成宮らは、連続撮影と単発撮影の両面から噴射特性を調べるため、液体噴射初期の拡大撮影に重点を置いた一連の観察を行ってきた^{(4)~(15)~(16)}。その中で、液体噴射の初期段階でまだ液柱が存在するときに、雰囲気圧力 P_a が小さいとき($P_a=0.1$ MPa 以下)では液体の先端から細い針状の液柱が伸び、雰囲気圧力が高くなれば($P_a=3$ MPa)針状の液柱が伸びることが無くなること等が示されている。

噴射直後の初期段階における噴流の発達過程や微粒化過程は、高速かつ非定常な現象であるため、計測によりそれらの詳細な知見を得ることは容易でない。

本報告では、円管ノズルから気体中に液体を非定常的に噴射したときの噴流の初期形状すなわち先端部形状の発達過程や液体の細分化過程等について、雰囲気圧力や初期流速の影響を数値計算により調べる。また、実験で得られている結果と比較する。

2. 基礎式および境界条件

基礎式は軸対称 2 次元の連続の式および運動の式で、気体および液体について別々に成り立つ。また、気液の界面の境界条件として MARS (multi-interface advection and reconstruction solver) 法⁽¹⁷⁾を用いる。自由表面を有する多相流解析法の一つである MARS 法は界面形状に関する情報を正確に保持しているため、通常の VOF (volume of fluid) 法よりも界面形状を精度良く捕獲できるとされている。詳細については文献⁽¹⁷⁾を参照できる。

計算領域を図 1 に示す。軸方向に 4 または 6 mm、半径方向に 1 mm (直径 2 mm) の円筒容器 (以下チャンバーという) があり、その下面の中心に円管ノズル (内径 0.3 mm、長さ 2 mm) がある。円管ノズルの下端から液体を上方向へ気体中に噴出させる。計算領域は流れを含めて軸対称とするので、左半分のみを計算し、右半分はそれを反転させる。左面は壁境界、中心軸は対称境界、下面は流れ境界 (初期液面)、上面は速度勾配をゼロとする自由流出境界としている。下面の流れ境界では平坦な速度分布を与える。計算領域が狭いのは、できるだけ小さい格子で計算を行うためである。

数値解析にはソフトウェアクレイドルの STREAM For Windows V8⁽¹⁸⁾を用いる。

3. 計算条件

液体 (軽油) は一様な初期流速で円管ノズルに流入するとする。初期流速 v_{inj} は $v_{inj} = C_d (2 \Delta P / \rho_0)^{0.5}$ で決まるとしている⁽¹⁹⁾。ここで、 C_d は係数で 0.7、 ΔP は噴射差圧、 ρ_0 は噴射される液体の密度である。噴射差圧 ΔP は現実には不明であるが、仮に、後の実験の開弁圧力ととり、17 MPa や 32 MPa とすると、初期流速は 140 m/s と 193 m/s になる。後の計算では、170 m/s と 183 m/s をとっている。初期流速の影響で特性が大きく変わるかどうかを調べるため、50 または 100 m/s でも計算を

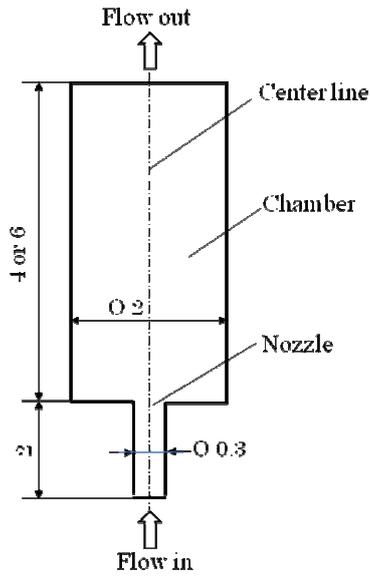


Fig.1 Computation domain (unit : mm)

行ったが、初期流速が大きい場合と比べて噴流の初期形状の特徴は類似している。時間経過とともに液体の流入速度を変化させた場合の計算も行っている。円管ノズル内およびチャンバー内には最初は静止した気体（空気）が充てんされている。流れは軸対称の層流とし、噴孔内でのキャビテーションや乱れの生成を考慮していない。また、重力の影響は無視する。

雰囲気圧力は 0.048~3 MPa で、雰囲気および液体の温度は 293 K とする。雰囲気圧力は減圧から加圧まで広く変化させているが、圧力を変えることにより気体の密度を大幅に変えていることになる。293 K での軽油の物性値は密度 ρ_0 は 840 kg/m³、粘性係数 μ_0 は 2.0×10^{-3} Pa·s、表面張力 σ_0 は 2.0×10^{-2} N/m とし、圧力の影響は無視する。空気の物性値は、粘性係数 μ_{air} は 17.98×10^{-6} Pa·s とし、圧力の影響は無視する。また、密度 ρ_{air} の圧力による変化は理想気体の式を用いて考慮する。計算は非定常計算で、典型的な時間刻み（初期流速が 170 m/s の場合）は 1.0×10^{-9} s とし、初期流速が 170m/s より小さいかまたは大きい場合は時間刻みをそれに反比例させて大きくするか小さくする。空間刻みは軸方向、半径方向共に 2 μ m としている。典型的な計算回数は 2 万回であり、計算時間は 4 コアの計算機で約 4 日であった。

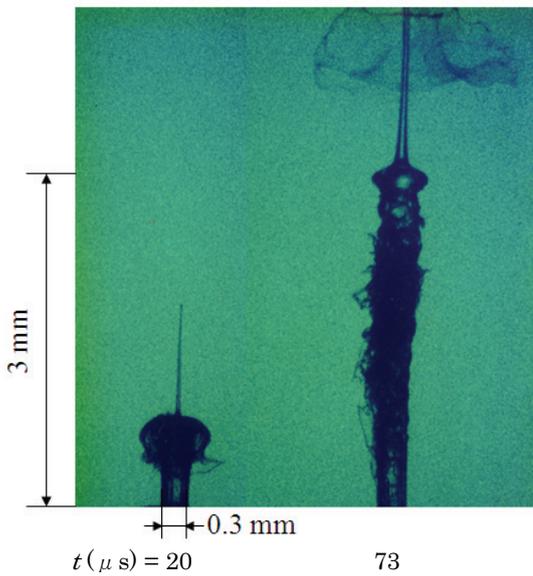


Fig. 2 Photographs of liquid injection ($P_a = 0.048$ MPa)

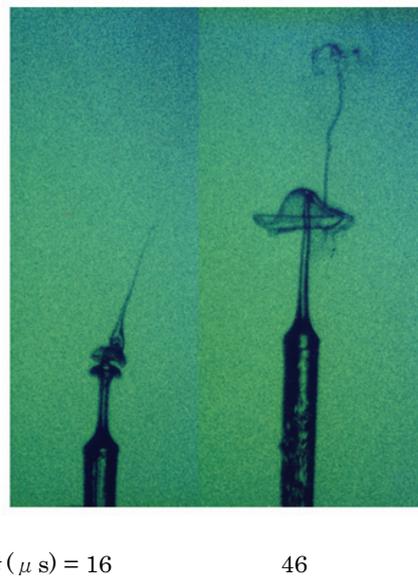


Fig. 3 Photographs of liquid injection ($P_a = 0.088$ MPa)

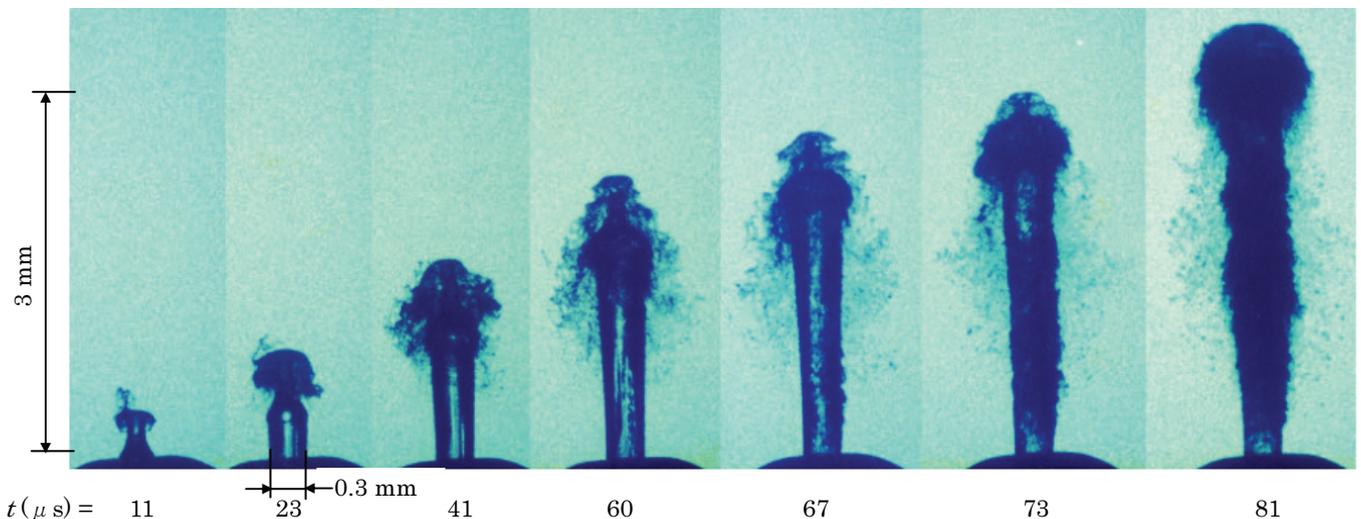


Fig. 4 Photographs of liquid injection ($P_a = 3$ MPa)

4. 実験結果

図 2 および 図 3 に雰囲気圧力 P_a が 0.048 MPa および 0.088 MPa, インジェクタ開弁圧力 P_o が 17 MPa で液体 (軽油) を噴射した場合の実験結果を示す. 実験での雰囲気は窒素である. 実験装置および方法等は文献 (4), (15), (16) を参照できる. それぞれ 2 枚の写真を並べており, ノズル出口は長さの尺度 (3mm) の下端である. 写真の下に記載した数字は噴射開始からの時間 $t(\mu\text{s})$ である. 噴射の初期段階では先端部に針のような非常に細い液柱が形成される. この液柱がなぜ形成されるのか, どういう条件で形成されるのか不明であった. 図 3 では, 先端部より太い中程度の太さの液柱の上に傘状の液膜が見られ, その先に非常に細い液柱が見られる.

図 4 に雰囲気圧力 P_a が 3 MPa, 開弁圧力 P_o が 32 MPa で液体を噴射した場合の実験結果を示す. 雰囲気圧力が高圧の場合には液柱の先端部に細い液柱が伸びる現象は観察されず, きのか状の傘のようなものがみられ, それが半径方向に広がり微粒化されていくようである.

5. 計算結果

図 5 は雰囲気圧力 P_a が 0.048 MPa, 液体の初期流速 v_{inj} が 170 m/s で, 噴射開始からの時間 $t(\mu\text{s})$ での液体の断面図 (以下コンターという) を示す. 左側の 3 つの図はノズル噴孔内部, その右側の 3 つの図はチャンバー内部に噴出している様子である.

ノズル噴孔径は以下同じ 0.3 mm である. 噴射開始からの時間 t が 6 μs では噴孔内の液体の先端は壁面より少し内側で伸びてきて, 全体的な流れとともに液体の先端はさらに伸びてくる. 時間 t が 8 μs では伸びてきた液体の先端は周辺部 (半径方向外側) に流れ, 薄い液膜となるものと中心部 (対称軸方向) に流れるものに別れる. 時間 t が 9 μs では中心部へと流れてきた液体が中心軸上で衝突する. 中心部で気体を取り込まれるとともに, 周囲からの液体の衝突により中心部の先端部の軸方向下流側への流速が早くなり, 非常に細い液柱が下流側に伸びる. その反動で中心部で取り込まれた気体中で細い液柱が上流側にも伸びる. 下流側の方が上流側より伸びが長いのは, 衝突前には下流側の方が上流側よ

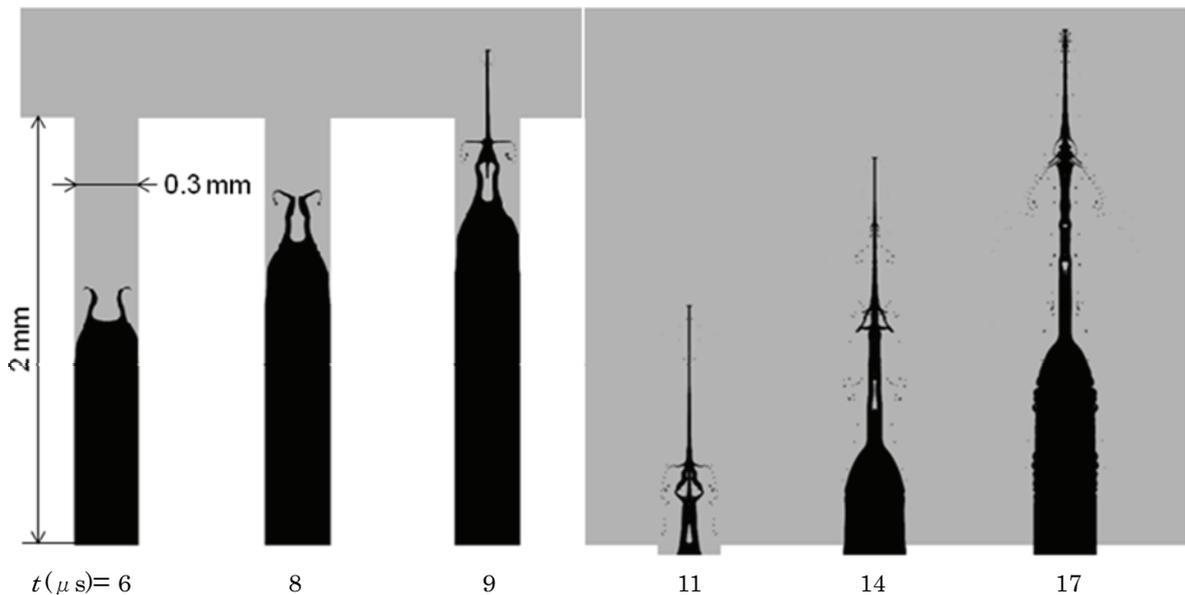


Fig. 5 Computed liquid contours ($P_a=0.048$ MPa, $v_{inj}=170$ m/s)

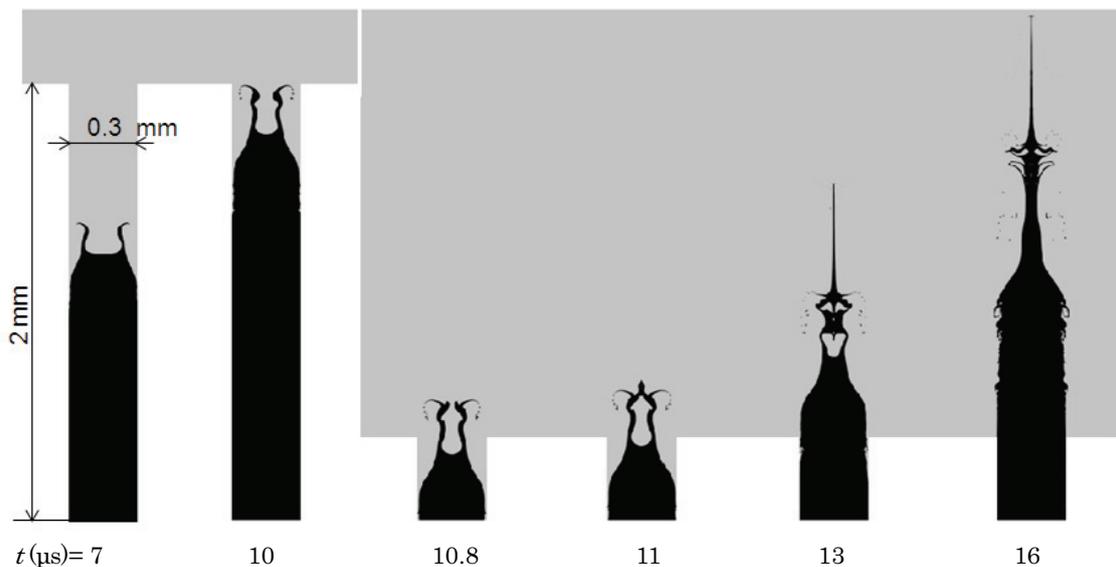


Fig. 6 Computed liquid contours ($P_a=0.088$ MPa, $v_{inj}=170$ m/s)

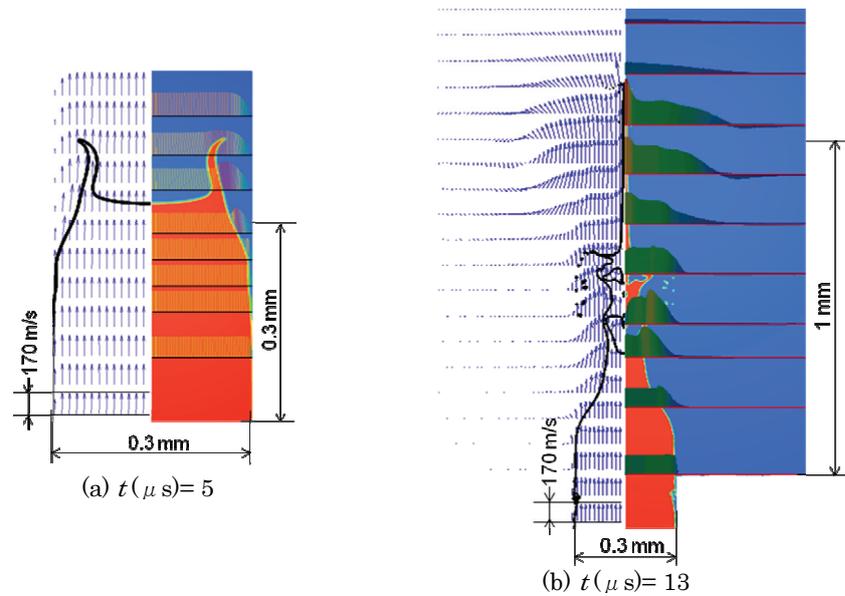


Fig. 7 Computed velocity profiles ($P_a=0.088$ MPa, $v_{inj}=170$ m/s)

り運動量が大きいと考えられる。周辺部の方向に流れる液膜は傘のような形をしており($t=9 \mu\text{s}$) 細分化される。軸対称の計算をしているので、この細分化は微粒子となっているのではなく、ドーナツ形状の液体となり、その断面を見ていることになる($t=9\sim 17 \mu\text{s}$)。その傘状の液膜を支える液柱は、気体を取り込まれた中程度の太さの液柱である($t=9, 11 \mu\text{s}$)。気体を含む液柱は最初周辺部に流れた液膜と合体して新しい傘状の液膜ができる($t=14 \mu\text{s}$)。中程度の太さの液柱は時間の経過とともに細くなり、さらにその先端に細い液柱が伸びている($t=14, 17 \mu\text{s}$)。

図6は雰囲気圧力 P_a が 0.088 MPa、液体の初期流速 v_{inj} が 170 m/s の場合であり、左の2つの図は噴孔内、右の4つの図はチャンパー内の液体のコンターである。噴射開始から非常に細い液柱が液体の噴流先端に生じる状況や、気体を取り込まれた中程度の太さの液柱が生じ($t=16 \mu\text{s}$)、その上に傘状の液膜が形成されている状態は図5と同様であるが、時間的には図5より遅れる。また、噴孔径と同じ太さの液柱の表面には細かい凹凸や液膜

が生じ始めている。

図7(a),(b)は図6の条件における噴孔内およびチャンパー内での代表的な時間における流速分布である。各図の左側は流速ベクトル、右側は各断面における流速分布である。図の最下段中央の流速は約 170 m/s である。図7(a)は液体先端が伸びてきたときの分布で、平坦な流速分布をしているところが多いが、周辺部の気液界面で流速が最大値をとる。これは液体の流れる断面積が小さくなるためと考えられる。固気界面(図の右端または左端)近傍では速度境界層ができています。図7(b)は液体先端に細い液柱が形成された時の流速分布である。このとき、流速の最大値は細い液柱の先端近くである。これは、前述のように中心部へと流れてきた液体が中心軸上で衝突し、先端部の軸方向下流側への流速が速くなったと考えられる。中程度の太さの液柱の外側の気液界面近くでは流速が極大値をとる傾向があり、ノズル噴孔入口の流速よりも大きい。

図8は雰囲気圧力 P_a が 3 MPa、液体の初期流速 v_{inj} が 183 m/s の場合の液体のコンターで、左の2つはノズル噴孔内、右の4つ

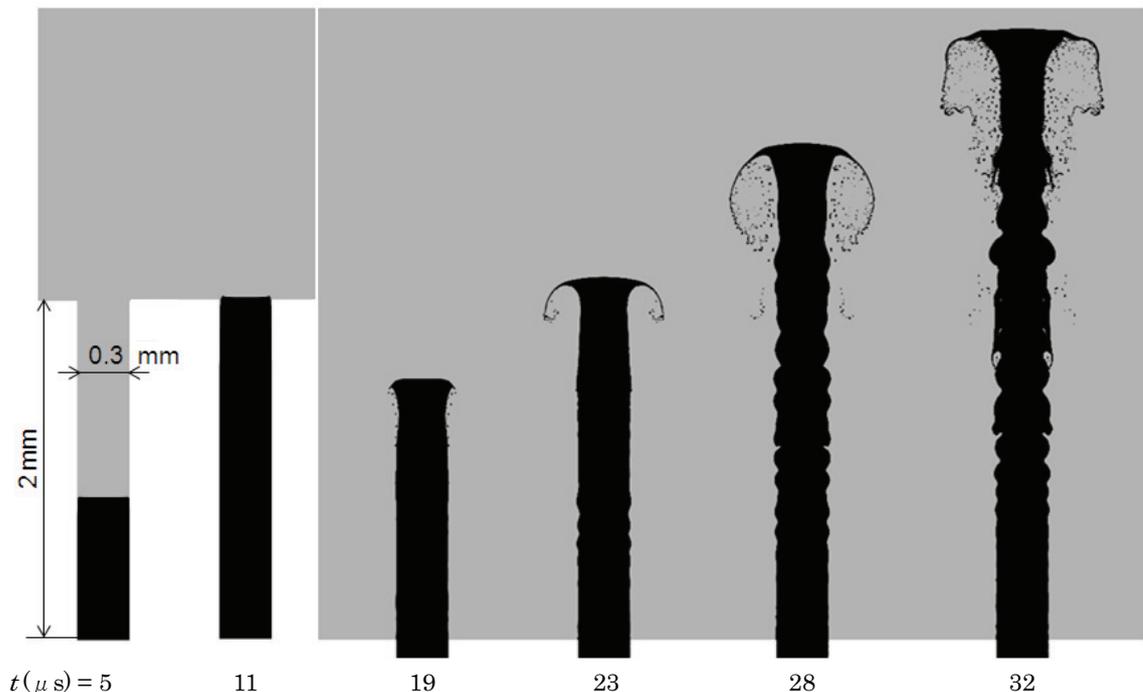


Fig. 8 Computed liquid contours ($P_a=3$ MPa, $v_{inj}=183$ m/s)

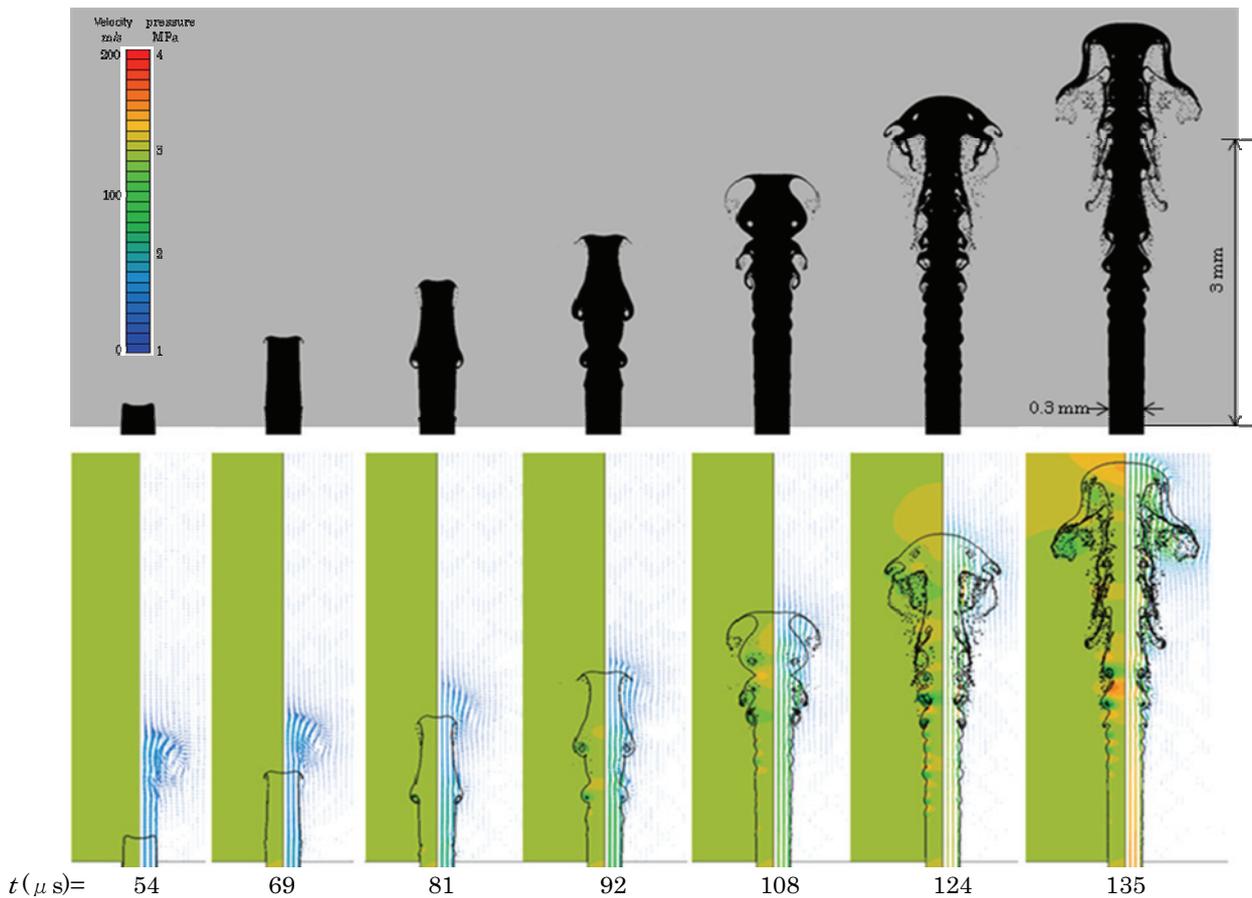


Fig. 9 Computed liquid contours, pressure and velocity ($P_a = 3 \text{ MPa}$, $v_{inj} = 40 - 120 \text{ m/s}$ (refer to context))

はチャンバー内である。雰囲気圧力が高くなると、噴孔内の液体先端はほとんど平坦である ($t = 5, 11 \mu\text{s}$)。チャンバーに入ってから、液体の先端は半径方向の外側に流れ、薄い液膜となり ($t = 19, 23 \mu\text{s}$)、さらに、下方に流れ、渦を形成する ($t = 23, 28 \mu\text{s}$)。その液膜が細分化される。噴孔と同じ程度の太さの液柱の表面には凹凸が成長し ($t = 23, 28, 32 \mu\text{s}$)、それから液膜が形成される ($t = 32 \mu\text{s}$)。

図 5, 6 と図 8 で先端部の状況が大きく異なるが、圧力が小さい図 5, 6 の場合は気体の密度が小さく、噴流先端が噴孔壁面から少し内側で伸びてきて、内側に流れた液体が中心軸上で衝突し、先端部に細い液柱を形成するが、圧力が大きくなり気体の密度が上がると噴流先端部の伸びが少なくなり、3 MPa 近くでは噴流先端が平坦になるのではないと思われる。

これまでの計算ではノズル入口における液体の流速が時間に対して一定としてきたが、実験⁽¹⁵⁾ではノズル噴孔出口近傍において流速が経過時間とともに変化することがわかっている。実験を参考にしてノズル入口の液体の流速を与えた。すなわち、 t が $0-60 \mu\text{s}$ では $v_{inj} = 40 \text{ m/s}$ で、 t が $60 \mu\text{s}$ を越えると $v_{inj} = (4/3)t \cdot 40 \text{ m/s}$ とした。初期流速の時間変化が $t = 60 \mu\text{s}$ で勾配が不連続となるが、計算では非圧縮性流体を考えているので、衝撃波や圧力波が発生することはない、かく乱が生じることはないと考えられる。雰囲気圧力を 3 MPa として計算した結果が図 9 である。噴孔内部では液体先端はほとんど平坦であるので、チャンパー内のみの様子を示す。

上段は液体のコンターである。チャンパー内で液体の先端は半径方向外側に伸び ($t = 69 \sim 92 \mu\text{s}$)、さらに下方に曲がり ($t = 108 \mu\text{s}$)、細分化する。その上流部の液体も周辺部へと膨らみ ($t = 92 \mu\text{s}$)、液柱の表面は波打ち、発達して ($t = 92 \sim 135 \mu\text{s}$)、液膜が形成され、それから細分化する ($t = 108 \sim 135 \mu\text{s}$)。また、先頭の傘状の液膜塊に先頭から 2 番目の傘状の液膜塊が合体して、大きい傘状の液膜ができていく ($t = 124, 135 \mu\text{s}$)。

下段の各図の右側には流速ベクトルを、左側には圧力分布を示す。図中の上段にはカラーの目盛りを示している。速度ベクトルを $t = 135 \mu\text{s}$ の図で見ると、中心部の液体の流速は先端部にいくほど徐々に下がっているが、先端部でも 100 m/s を越している。傘の内部の気体は 100 m/s を越す高速となっている。圧力分布を $t = 135 \mu\text{s}$ の図で見ると、液体の先端中央部は 3.2 MPa と高くなっており、傘の内部の気体領域は 2.9 MPa と低くなっている。また、液柱表面にできる凹凸の近傍は、凸のところで圧力が低く、凹のところで圧力が高い傾向がある。これらは、細分化していく噴流内の流速や圧力の分布について記述したものである。

6. 計算と実験の比較

実験では、雰囲気圧力 P_a が低い場合 ($P_a = 0.048, 0.088 \text{ MPa}$)、液体噴流の初期段階で先端部に針のような非常に細い液柱が形成される。これは計算でも生じ、その原因は計算結果の図 5 ($P_a = 0.048 \text{ MPa}$) で説明しているが、図 6 ($P_a = 0.088 \text{ MPa}$) の場合も同様である。また、図 3 ($P_a = 0.088 \text{ MPa}$) には非常に細い液柱、中程度の太さの液柱および噴孔と同じ程度の液柱と、3 段階の液柱ができる。計算では、非常に細い液柱は前述の通りであるが、中程度の太さの幹の液柱も形成されることもわかる。その下流には傘状の液膜も形成される。ただし、この傘は実験ほどには半径方向には広がっていない。

雰囲気圧力 P_a が 3 MPa と高くなると、実験では液柱の先端部に非常に細い液柱が伸びる現象は観察されず、液体の先端はきのこ状の傘のようなものが見られる。計算では、液体の先端はほとんど平坦であり、先端部に渦を形成し、細分化する。噴孔入口の速度を一定とすると、噴孔と同じ程度の太さの液柱は実験に比べて凹凸が少なく、細分化も起こりにくい。しかし、噴孔入口の速度を実験を参考にして変化させた場合、噴流の形が実験により近くなり、細分化がより進行しているように見える。

7. まとめ

円管ノズルから液体を気体中に噴射するときの初期過程で、圧力が低い場合に噴流の先端で非常に細い液柱が形成し、圧力が高くなるとそれが平坦になる理由等を雰囲気圧力を大幅に変え、また、ノズル噴孔入口流速を時間的に変化させて解析し、実験とも比較した。得られた結果は次のとおりである。

(1) 雰囲気圧力が低い場合 ($P_a = 0.048, 0.088$ MPa), ノズル噴孔内の壁面付近の周辺部から液体が伸び始め、その液体は半径方向の内側と外側の二方向に分かれる。内側へ伸びた液体が中心軸上で衝突することによって液体先端部に軸方向へと伸びる非常に細い液柱を形成する。また、外側へと伸びた液体が傘状の液膜を形成し、それが細分化する。傘の幹となるのは気体を巻き込んだ中程度の太さの液柱である。雰囲気圧力が高いほどこれらの変化が遅れる。

(2) 雰囲気圧力が低い場合、速度の最大値は非常に細い液柱の先端近くである。また、中程度の太さの液柱の外側の気液界面近くも速度が極大値をとる傾向があり、ノズル噴孔入口の速度よりも大きい。

(3) 雰囲気圧力が高い場合 ($P_a = 3$ MPa), 噴射液体の先端は平坦に近く、中心部から伸びる細い液柱は見られない。初期には先端部が周辺部へ流れる傘状の液膜が見られ、渦を形成し、それが細分化する。

(4) 雰囲気圧力が高い場合、ノズル噴孔内での流速を実験に基づいて時間的に変化させると、先端部の傘状の液膜以外にさらに次の傘状の液膜ができ、これらが合体する。また、液柱の表面にも凹凸や液膜ができやすくなり、それが細分化する。

8. 参考文献

- (1) 日本液体微粒化学会: アトマイゼーション・テクノロジー, 森北出版, (2001).
- (2) 清水正則, 新井雅隆, 廣安博之: 高速液体噴流の分裂過程, 日本機械学会論文集, B編 54-504 (1988), 2236-2244.
- (3) 横田治之, 神本武征, 小林治樹: 画像計測によるディーゼル噴霧・火炎の研究 (第1報, 噴射圧力が噴霧特性とすす生成および燃焼特性に及ぼす影響), 日本機械学会論文集, B編 54-499 (1988), 741-748.
- (4) 成宮喜久男, 服部廣司, 角田敏一: ディーゼル機関の燃料噴霧構造に関する研究(液柱状噴流の分裂過程の観察), 第8回微粒化シンポジウム講演論文集, (1999), 259-264.
- (5) 范 秦寅, 高城敏美, 神本武征, 岡本達幸: 非定常噴霧流の数値シミュレーション(蒸発および非蒸発噴霧流), 日本機械学会論文集, B編, 56-528 (1990), 2510-2518.
- (6) T. Takagi, C. Y. Fang, T. Kamimoto, T. Okamoto: Numerical Simulation of Evaporation, Ignition and Combustion of Transient Sprays, *Combustion Science and Technology*, 75 (1991), 1-12.
- (7) 玉木伸茂, 西田恵哉, 清水正則, 廣安博之: 液体噴流の微粒化過程に及ぼす噴孔内流れの影響 (第2報, ノズルの幾何学形状および雰囲気圧力の影響), 微粒化, 5-3 (1996), 98-105.
- (8) A. Sou, S. Hosokawa, A. Tomiyama: Effects of Cavitation in a Nozzle on Liquid Jet Atomization, *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, 50 (2007), 3575-3582.
- (9) 河原伸幸, 富田栄二, 中越真一, 住田守: 実用ガソリンインジェクターにおける微粒化過程の可視化(液糸分裂, 液滴の衝突・合体挙動), 微粒化, 18-62 (2009), 3-9.
- (10) 八房智顕, 木戸口義行, アブドゥラー アダム, 五味智紀: 長距離顕微シャドウグラフ撮影によるディーゼル噴霧の液滴径計測, 微粒化, 18-63 (2009), 2-9.

- (11) 堀司, 千田二郎, 藤本元: Large Eddy Simulation を用いたディーゼル噴霧微細構造の数値解析, 自動車技術, 62-5 (2008), 65-71.
- (12) 新城淳史, 松山信吾, 溝渕康寛, 小川哲, 梅村章: 伝播性表面張力波による液糸からの液滴分断機構に関する数値解析, 微粒化, 18- 61 (2009), 36-43.
- (13) 新城淳史, 梅村章: 液体燃料一次微粒化の詳細数値解析, 微粒化, 19- 66 (2010), 12-17.
- (14) 天谷賢児, 新井雅隆: 液体噴流分裂現象の周波数解析 (第4報, 位相スペクトルによる表面波の軸対称性解析), 微粒化, 9-25 (2000), 2-8.
- (15) H. Hattori, K. Narumiya, M. Tue, T. Kadota: Analysis of Initial Breakup Mechanism of Diesel Spray Injected into High-Pressure Ambience, SAE World Congress, 2004-01-0528, (2004).
- (16) 服部廣司, 成宮喜久男: ディーゼル噴霧の分裂過程の解析, (拡大撮影による噴霧先端部挙動の観察), 日本機械学会 RC151 分科会, (1999), 233-238.
- (17) 功刀資彰: 自由界面を含む多相流の直接数値解析法, 日本機械学会論文集 B編, 63-609 (1997), 1576-1584.
- (18) ソフトウェアクレイドル: STREAM for Windows V8, (2009).
- (19) P.J. O'Rourke: Collective Drop Effects on Vaporizing Liquid Sprays, Ph. D. Thesis, Princeton University, (1981).



高城敏美
大阪大学名誉教授
〒569-1047 高槻市大和 1-22-12
Tel&Fax 072-693-3501
略歴

1968年大阪大学大学院工学研究科機械工学専攻博士課程修了, 同年 同助手, 同助教授 産業機械工学科,
1981年 同教授 1998年 同工学研究科教授 機械物理工学専攻, 2004年 同名誉教授,
同年大阪産業大学客員教授, 2010年同退職
主に, 熱工学, 燃焼, 熱・物質移動に関する研究, 最近は液体噴射の研究を行う



成宮喜久男
大阪産業大学工学部交通機械工学科
講師
〒574-8530 大阪府大東市中垣内 3-1-1
Tel 072-875-3001 Fax 072-871-1289
略歴

1977年 大阪産業大学工学部機械工学科卒業, 同年 大阪産業大学工学部
技術員 交通機械工学科, 1993年 同助手, 2003年 同講師
主に, ディーゼル機関の噴射・混合気形成・燃焼の研究を行う